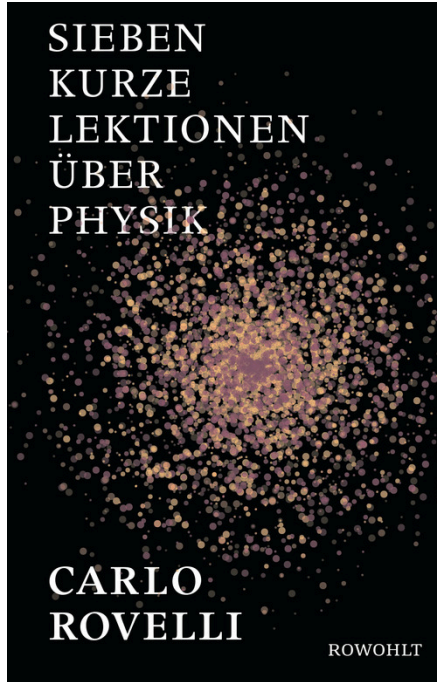


Leseprobe aus:



ISBN: 978-3-498-05804-3

Mehr Informationen zum Buch finden Sie auf www.rowohlt.de.

CARLO ROVELLI

**SIEBEN KURZE
LEKTIONEN ÜBER PHYSIK**

Aus dem Italienischen von Sigrid Vagt

ROWOHLT

Die italienische Originalausgabe erschien 2014
unter dem Titel «Sette brevi lezioni di fisica»
bei Adelphi Edizioni, Mailand.

Die Übersetzerin dankt dem Deutschen Übersetzerfonds
für die großzügige Förderung dieser Arbeit.

1. Auflage September 2015
Copyright © 2015 by Rowohlt Verlag GmbH,
Reinbek bei Hamburg
«Sette brevi lezioni di fisica» Copyright
© 2014 by Adelphi Edizioni S.p.A., Mailand
Lektorat Frank Strickstroock
Wissenschaftliches Lektorat Bernd Schuh
Die Lukrez-Zitate auf den Seiten 89, 90 folgen der
Ausgabe von «Über die Natur der Dinge» in
der Übersetzung von Klaus Binder, Galiani, Berlin 2014
Einbandgestaltung Anzinger | Wüschner | Rasp, München,
nach dem Entwurf der englischen Ausgabe bei
Allen Lane / Penguin (Gestaltung Coralie Bickford-Smith)
Satz aus der Apollo, InDesign,
bei Pinkuin Satz und Datentechnik, Berlin
Druck und Bindung CPI books GmbH, Leck, Germany
ISBN 978 3 498 05804 3

Vorwort

Diese Lektionen wurden für Leser geschrieben, die eher wenig über die modernen Naturwissenschaften wissen. In einem kurzen Überblick veranschaulichen sie einige der wichtigsten und faszinierendsten Aspekte der großen Revolution, die in der Physik des zwanzigsten Jahrhunderts stattgefunden hat, und erläutern vor allem die dadurch aufgeworfenen Fragen und Rätsel. Denn die Naturwissenschaft zeigt uns, wie wir die Welt besser verstehen können, aber sie zeigt uns auch, wie viel wir noch nicht wissen.

Die erste Lektion ist der «schönsten der Theorien» gewidmet, der Allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein. Die zweite der Quantenmechanik, in der sich die verwirrendsten Aspekte der modernen Physik verbergen. Die dritte beschäftigt sich mit dem Kosmos: der Architektur des Universums, in dem wir leben. Die vierte mit den Elementarteilchen. Die fünfte mit der Quantengravitation: den fortschreitenden Bemühungen um eine Synthese der großen Entdeckungen des zwanzigsten Jahrhunderts. Die sechste mit der Wahrscheinlichkeit und der Wärme der Schwarzen Löcher. Der Schlussteil des Buches wendet sich der Frage zu, wie wir uns innerhalb der sonderbaren Welt, die diese Physik beschreibt, eine Vorstellung von uns selbst machen können.

Erste Lektion

Die schönste der Theorien

Als junger Mann bummelt Albert Einstein ein Jahr lang herum. Wer keine Zeit vergeudet, kommt nirgendwohin, was die Eltern von Heranwachsenden leider oft vergessen. Nachdem er in Deutschland von der Schule abgegangen war, weil er die Zucht und Strenge auf dem Gymnasium nicht ertrug, folgte er seiner Familie nach Pavia. Das war zu Anfang des Jahrhunderts, und Italien stand am Beginn der industriellen Revolution. Sein Vater errichtete als Ingenieur in der Poebene die ersten Elektrizitätswerke. Albert las Kant und hörte zum Zeitvertreib Vorlesungen an der Universität von Pavia. Rein zum Vergnügen, ohne immatrikuliert zu sein und ohne Examina abzulegen. So wird man ein ernsthafter Wissenschaftler.

Schließlich schreibt er sich in Zürich am Polytechnikum ein und vertieft sich in die Physik. Nur wenige Jahre später, 1905, schickt er drei Artikel an die damals renommierteste wissenschaftliche Zeitschrift, die «Annalen der Physik». Alle drei sind nobelpreiswürdig. Der erste beweist die tatsächliche Existenz der Atome. Der zweite öffnet die Tür zur Quantenmechanik, von der in der nächsten Lektion die Rede sein wird. Der dritte stellt seine erste Theorie der Relativität vor (heute «Spezielle Relativitätstheorie» genannt), die erklärt, dass die Zeit nicht für alle gleich schnell vergeht: Zwei Zwillinge treffen sich unterschiedlich gealtert wieder, wenn einer von beiden mit sehr hoher Geschwindigkeit eine große Entfernung zurückgelegt hat.

Unversehens wird Einstein zum renommierten Wissenschaftler und bekommt Angebote von verschiede-

nen Universitäten. Doch etwas stört ihn: Seine Relativitätstheorie, wie gefeiert auch immer, stimmt nicht mit dem überein, was man über die Schwerkraft weiß, also darüber, wie die Dinge fallen. Dies wird ihm klar, als er für eine Zeitschrift einen Artikel über seine Theorie schreibt, und er fragt sich, ob die altehrwürdige Gravitationslehre des großen Vaters Newton nicht ebenfalls revidiert werden muss, damit sie mit der neuen Relativität kompatibel wird. Er vertieft sich in das Problem. Bis es gelöst ist, dauert es zehn Jahre. Zehn Jahre lang verrückte Forschungen, Versuche, Irrtümer, Verwirrung, misslungene Artikel, Geistesblitze, Fehlschlüsse. Im November 1915 schließlich gibt er einen Artikel in den Druck, der die vollständige Lösung enthält: eine neue Theorie der Gravitation, der er den Namen «Allgemeine Relativitätstheorie» gibt, sein Meisterwerk. Der große russische Physiker Lew Landau nannte sie die «schönste der wissenschaftlichen Theorien».

Es gibt vollkommene Meisterwerke, die uns tief berühren, Mozarts «Requiem», die «Odyssee», die Sixtinsche Kapelle, «König Lear» ... Sie in all ihrem Glanz zu erfassen, mag eine entsprechende Ausbildung voraussetzen. Doch der Lohn ist Schönheit pur. Und nicht nur das: Auch ein neuer Blick auf die Welt tut sich vor unseren Augen auf. Eines dieser Meisterwerke ist die Allgemeine Relativitätstheorie, das Juwel von Albert Einstein.

Ich erinnere mich, wie aufgeregt ich war, als ich anfing, etwas davon zu begreifen. Es war Sommer. Ich war an einem Strand in Kalabrien, in Condofuri, eingetaucht in das Licht dieser griechisch geprägten Mittelmeerküste, im letzten Jahr meines Studiums. Die Ferienzeit eignet sich am besten zum Lernen, weil man nicht durch die Lehrveranstaltungen abgelenkt ist. Das Buch, das ich zum Lernen benutzte, war an den Rändern von Mäusen angenagt, weil ich damit nachts in dem etwas hippiemä-

ßigen, verwahrlosten Haus in den umbrischen Hügeln, wohin ich gelegentlich vor der Langeweile der Universitätsvorlesungen in Bologna geflohen war, immer die Löcher dieser armen Tierchen verstopft hatte. Hin und wieder blickte ich vom Buch auf und betrachtete das Funkeln des Meeres. Es kam mir vor, als sähe ich das Sichkrümmen von Raum und Zeit, wie es Einstein sich vorgestellt hatte.

Es war wie ein Zauber: als ob ein Freund mir eine einzigartige verborgene Wahrheit ins Ohr flüsterte, einen Schleier vor der Realität fortnahm und eine einfachere, tiefere Ordnung enthüllte. Seit wir gelernt haben, dass die Erde rund ist und sich wie ein rasender Kreisel dreht, haben wir begriffen, dass die Realität nicht so ist, wie sie uns erscheint. Wenn wir ein neues Detail errahnen, ist das jedes Mal aufregend. Ein weiterer Schleier fällt.

Immer wieder hat sich unser Wissen im Lauf der Geschichte sprunghaft voranbewegt. Doch der Sprung, den Einstein vollbrachte, ist wohl ohnegleichen. Warum? Vor allem, weil die Theorie, hat man erst einmal verstanden, wie sie funktioniert, so einfach ist, dass es einem den Atem nimmt. Ich fasse die Idee zusammen:

Newton hatte versucht zu erklären, warum die Dinge fallen und die Planeten kreisen. Er entwickelte die Vorstellung von einer «Kraft», die alle Körper zueinander hinzieht, und nannte sie «Gravitation». Wie diese Kraft es anstellt, weit voneinander entfernte Dinge ohne irgendeine Vermittlung zueinander hinzuziehen, das blieb dem Wissen vorenthalten, und der große Vater der Wissenschaft hütete sich wohlweislich, Vermutungen zu riskieren. Weiter stellte sich Newton vor, dass sich die Körper im Raum bewegen und der Raum ein großer leerer Behälter ist, eine Riesenschachtel für das Universum. Ein gewaltiges starres Gebilde, in dem die Dinge geradlinig ihre Bahn ziehen, bis eine Kraft sie ablenkt. Woraus

dieser von Newton erdachte «Raum», dieser Weltbehälter, bestand, auch das blieb dem Wissen entzogen.

Doch wenige Jahre vor Alberts Geburt hatten zwei große britische Physiker, Faraday und Maxwell, die leere Welt Newtons um eine weitere Zutat ergänzt: das elektromagnetische Feld. Das Feld ist eine allgegenwärtige reale Entität, die die Radiowellen trägt, den Raum füllt, wie die Oberfläche eines Sees wogen und schwanken kann und die Elektrizität «ringsum verteilt». Einstein fasziniert das elektromagnetische Feld von Kindheit an, es bewegt die Generatoren in den von Papa erbauten Elektrizitätswerken, und schon früh begreift er, dass ebenso wie die Elektrizität auch die Gravitation von einem Feld getragen sein muss. Entsprechend dem «elektrischen Feld» muss es auch ein «Gravitationsfeld» geben; und er denkt darüber nach, wie dieses «Gravitationsfeld» beschaffen sein könnte und mit welchen Gleichungen es sich beschreiben ließe.

Und dann hat er die verblüffende Idee, den genialen Einfall: Das Gravitationsfeld ist nicht *im Raum ausgebreitet*, sondern es *ist* der Raum. Das ist der Grundgedanke der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Newtons «Raum», in dem sich die Dinge bewegen, und das «Gravitationsfeld» als Träger der Schwerkraft sind ein und dasselbe.

Es ist eine Erleuchtung. Eine eindrucksvolle Vereinfachung der Welt: Der Raum ist nicht länger etwas anderes als die Materie. Er ist eine der «materiellen» Komponenten der Welt. Eine wogende, sich biegende, sich krümmende, sich verformende Entität. Wir sind nicht in einem unsichtbaren starren Gebilde gefangen, sondern gewissermaßen in eine Art Molluske, in einen riesigen verformbaren Weichkörper, eingebettet. Die Sonne biegt den Raum um sich herum, und die Erde dreht sich nicht deshalb um die Sonne, weil sie von einer ge-

heimnisvollen Kraft gezogen wird, sondern weil sie sich geradlinig in einem Raum bewegt, der gebogen ist. Wie eine Kugel, die in einen Trichter rollt. Es gibt keine geheimnisvollen «Kräfte», die in der Mitte des Loches entstehen, sondern die Krümmung der Wände lässt die Kugel rollen. Die Planeten kreisen um die Sonne, und die Dinge fallen, weil der Raum sich krümmt.

Wie kann man die Krümmung des Raums beschreiben? Der größte Mathematiker des neunzehnten Jahrhunderts, Carl Friedrich Gauß, der «Fürst der Mathematiker», hatte eine Mathematik zur Beschreibung gekrümmter zweidimensionaler Flächen wie der Oberfläche von Hügeln verfasst. Dann forderte er einen begabten unter seinen Studenten auf, das Ganze auf drei- oder mehrdimensionale gekrümmte Räume zu verallgemeinern. Der Student, Bernhard Riemann, fertigte eine jener mühevollen Doktorarbeiten an, die vollkommen nutzlos erscheinen. Mit dem Ergebnis, dass die Merkmale eines gekrümmten Raums von einem bestimmten mathematischen Werkzeug erfasst werden, das wir heute Krümmungstensor nennen und mit R bezeichnen. Einstein stellt eine Gleichung auf, die besagt, dass R der Energie der Materie proportional ist. Das heißt, der Raum krümmt sich dort, wo Materie ist. Das ist alles. Die Gleichung besteht aus einer halben Zeile, mehr nicht. Eine Vision – der sich krümmende Raum – und eine Gleichung.

Aber in dieser Gleichung ist ein funkelndes Universum enthalten. Die Theorie erweist sich als faszinierend fruchtbar und löst eine phantastische Folge von Vorhersagen aus, die den Wahnideen eines Verrückten gleichen, und doch werden alle später experimentell bestätigt.

Zunächst einmal beschreibt die Gleichung, wie sich der Raum um einen Stern krümmt. Aufgrund dieser

Krümmung kreisen nicht nur die Planeten um den Stern; auch das Licht breitet sich nicht länger geradlinig aus, sondern weicht von seiner Bahn ab. Einstein sagt voraus, dass die Sonne das Licht ablenkt. 1919 wird die Messung durchgeführt, und die Vorhersage erweist sich als zutreffend.

Aber nicht nur der Raum krümmt sich, sondern auch die Zeit. Einstein sagt voraus, dass die Zeit in der Höhe schneller vergeht als unten, in Erdnähe. Das wird nachgemessen, und es stimmt. Der Unterschied ist gering, aber der Zwilling, der am Meer lebt, findet den Zwilling, der in den Bergen gelebt hat, ein wenig älter vor, als er selbst es ist. Und das ist erst der Anfang.

Wenn ein großer Stern seinen gesamten Brennstoff (den Wasserstoff) verbrannt hat, erlischt er schließlich. Was übrig bleibt, wird nicht mehr durch die Verbrennungswärme stabilisiert und fällt unter dem Druck seines eigenen Gewichts in sich zusammen, bis es den Raum so stark krümmt, dass es in ein veritables Loch stürzt. So entstehen die berühmten *Schwarzen Löcher*. Als ich studierte, galten sie noch als wenig glaubwürdige Vorhersage einer esoterischen Theorie. Heute werden sie am Himmel zu Hunderten beobachtet und von den Astronomen in ihren Details erforscht. Doch damit nicht genug.

Der gesamte Raum kann sich weiten und dehnen. Ja, die Einstein'sche Gleichung besagt sogar, dass der Raum nicht in Ruhe verharren kann, sondern expandieren *muss*. 1930 wird die Ausdehnung des Universums tatsächlich beobachtet. Wie die Gleichung auch voraussagt, muss die Expansion durch die Explosion eines winzig kleinen und extrem heißen jungen Universums ausgelöst worden sein: den *Big Bang*. Und wieder glaubt es niemand, doch die Beweise häufen sich, bis am Himmel die *kosmische Hintergrundstrahlung* beobach-

tet wird: die diffuse Strahlung, die von der Hitze der Anfangsexplosion noch übrig ist. Die Voraussage der Einstein'schen Gleichung ist richtig.

Und weiter sagt die Theorie voraus, dass sich der Raum kräuselt wie die Meeresoberfläche. Die Auswirkungen dieser «Gravitationswellen» werden am Himmel an Doppelsternen beobachtet und stimmen mit den Vorhersagen der Theorie überein, bis zu einer unglaublichen Genauigkeit von eins zu hundert Milliarden. Und so weiter.

Kurz, die Theorie beschreibt eine bunte, erstaunliche Welt, in der Universen explodieren, der Raum in ausweglosen Löchern versackt, die Zeit sich beim Herabsinken auf einen Planeten verlangsamt und die grenzenlosen Weiten des interstellaren Raums sich kräuseln und wogen wie die Meeresoberfläche ... und all dies, was da nach und nach aus meinem von den Mäusen angegagten Buch zum Vorschein kam, war kein Märchen, das ein Schwachsinniger in einem Anfall von Phantasterei erzählte, nicht die Auswirkung der glühenden Mittelmeer-sonne in Kalabrien, keine Halluzination über dem Flimmern des Meeres. Es war Realität.

Oder besser, eine Realität, die etwas weniger verschleiert war als in unserer getrübten Alltagsicht. Eine Realität, die ebenfalls aus dem Stoff besteht, aus dem die Träume sind, aber doch realer ist als unser vernebelter Alltagstraum.

All dies war das Resultat einer elementaren Intuition - Raum und Feld sind ein und dasselbe - und einer einfachen Gleichung, die ich nicht umhinkann, hier niederzuschreiben, auch wenn meine Leser sie sicher nicht entschlüsseln können, aber ich möchte wenigstens deren große Einfachheit sichtbar machen.

$$R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} = T_{ab}$$

Das ist alles. Natürlich muss man eine Ausbildung absolvieren, um die Riemann'sche Mathematik zu verstehen, und sich die Technik aneignen, um diese Gleichung lesen zu können. Ein gewisses Maß an Fleiß und Mühe ist dafür erforderlich. Allerdings weniger, als man braucht, um die seltene Schönheit eines der letzten Beethoven-Quartette hören zu können. Belohnt aber wird man im einen wie im andern Fall mit Schönheit und einem neuen Blick auf die Welt vor unseren Augen.

Zweite Lektion

Die Quanten

Die beiden Eckpfeiler der Physik des zwanzigsten Jahrhunderts, die Allgemeine Relativitätstheorie, von der in der ersten Lektion die Rede war, und die Quantenmechanik, die ich hier behandle, könnten unterschiedlicher nicht sein.

Beide Theorien lehren uns, dass die Natur in ihrem inneren Aufbau komplexer ist, als es uns erscheint. Allerdings gleicht die Allgemeine Relativitätstheorie einem kompakten Edelstein. Erdacht von einem einzigen Kopf, Albert Einstein, ist sie eine einfache, kohärente Vision von Schwerkraft, Raum und Zeit. Dagegen hat die Quantenmechanik oder «Quantentheorie» zwar einen beispiellosen experimentellen Erfolg gehabt und Anwendungen mit sich gebracht, die unseren Alltag verändert haben (zum Beispiel den Computer, mit dem ich schreibe), doch ein Jahrhundert nach ihrer Entstehung gilt sie immer noch als unverständlich und rätselhaft.

Man pflegt zu sagen, die Quantenmechanik sei genau im Jahr 1900 entstanden, gewissermaßen als Eröffnung eines Jahrhunderts intensiver Forschung. Der deutsche Physiker Max Planck berechnet die elektromagnetische Strahlung innerhalb eines glühenden Hohlraums im thermischen Gleichgewicht. Dabei bedient er sich eines Tricks: Er stellt sich vor, dass die Energie des elektromagnetischen Feldes in «Quanten» aufgeteilt ist, das heißt in kleinste Energiepakete, Energieklumpen. Die Methode erbringt ein Resultat, das mit den Messergebnissen völlig übereinstimmt (und also auf irgendeine Weise korrekt sein muss), das aber im Widerspruch steht zu allem, was man zu der Zeit wusste. Denn Energie wurde als etwas betrachtet, das sich kontinuierlich

verändert, und es gab keinen Grund, sie zu behandeln, als bestünde sie aus einzelnen Backsteinen.

Die Energie wie feste Päckchen zu behandeln, war für Max Planck ein seltsamer Rechenrick gewesen, bei dem er selbst nicht verstand, warum er funktionierte. Und wieder war es Albert Einstein, der fünf Jahre später begriff, dass diese «Energiepäckchen» real waren.

Einstein weist nach, dass das Licht aus Päckchen besteht: aus Lichtpartikeln. Heute nennen wir sie «Photonen». In der Einleitung zu dem entsprechenden Aufsatz schreibt er:

«Es scheint mir nun in der Tat, daß die Beobachtungen über die <Schwarze Strahlung>, Photolumineszenz, die Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht und andere die Erzeugung bez. Verwandlung des Lichtes betreffende Erscheinungsgruppen besser verständlich erscheinen unter der Annahme, daß die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei. Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen, und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können.»

Diese einfachen, klaren Zeilen sind die wahre Geburtsurkunde der Quantentheorie. Man beachte das wunderbare «Es scheint mir ...» am Anfang, das an das «Ich denke ...» erinnert, mit dem Darwin in seinen Notizbüchern den großen Gedanken der Evolution der Arten einleitet, oder an das «Zögern», von dem Faraday spricht, als er in seinem Buch die revolutionäre Idee des elektrischen Feldes vorstellt. Das Genie zögert.

Einsteins Arbeit wird anfänglich von seinen Kollegen wie die Jugendtorheit eines brillanten Jungen behandelt. Später erhält er für diese Arbeit den Nobelpreis. Wenn Planck der Vater der Theorie ist, dann ist Einstein derjenige, der sie großgezogen hat.

Doch wie alle Kinder ist die Theorie dann ihre eigenen Wege gegangen, und Einstein erkannte sie nicht mehr wieder. In den zehner und zwanziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts ist es der Däne Niels Bohr, der ihre Entwicklung vorantreibt. Er begreift, dass auch die Elektronenenergie in den Atomen ebenso wie die Lichtenergie nur bestimmte «quantisierte» Werte annehmen kann, und vor allem, dass die Elektronen nur zwischen Umlaufbahnen bestimmter Energien hin und her springen können, wobei sie beim «Springen» ein Photon abgeben oder eins aufnehmen. Das sind die berühmten «Quantensprünge». In seinem Institut in Kopenhagen versammeln sich die brilliantesten Köpfe des Jahrhunderts. Sie nehmen sich vor, Ordnung in diese unverständlichen Verhaltensweisen in der Welt der Atome zu bringen und eine kohärente Theorie zu entwerfen.

1925 erscheinen endlich die Gleichungen der Theorie, die die gesamte Newton'sche Mechanik ersetzen. Man kann sich kaum einen größeren Triumph vorstellen. Plötzlich passt alles zusammen, und man kann alles berechnen. Nur ein Beispiel: Erinnern Sie sich an die Wandkarte, die in so vielen Klassenzimmern hing, mit dem Periodensystem von Mendelejew, das alle möglichen chemischen Elemente auflistet, aus denen das Universum besteht, vom Wasserstoff bis zum Uran? Wieso sind es gerade diese Elemente und wieso hat das Periodensystem gerade diesen Aufbau, mit diesen Perioden, und die Elemente gerade jene Eigenschaften? Die Antwort: Jedes Element stellt eine Lösung der Grundgleichungen dar.

chung der Quantenmechanik dar. Die gesamte Chemie ergibt sich aus dieser einzigen Gleichung.

Der Erste, der die Gleichungen der neuen Theorie aufstellt, ist ein junges deutsches Genie: Werner Heisenberg, der sich auf schwindelerregende Ideen stützt.

Heisenberg stellt sich vor, dass die Elektronen *nicht* ständig existieren. Es gibt sie nur, wenn jemand sie beobachtet, oder besser gesagt, wenn sie mit etwas anderem in Wechselwirkung treten. Mit einer berechenbaren Wahrscheinlichkeit materialisieren sie sich an einem Ort, wenn sie mit irgendetwas zusammenstoßen. Die « Quantensprünge » von einer Umlaufbahn zur anderen sind ihre einzige Form von Realität: Ein Elektron ist eine Gesamtheit von Sprüngen von einer Wechselwirkung zu einer anderen. Wenn niemand es stört, befindet es sich an keinem genauen Ort. Es befindet sich an gar keinem Ort.

Es ist, als hätte Gott die Wirklichkeit nicht mit einer dicken Linie gezeichnet, sondern nur leicht gestrichelt.

In der Quantenmechanik hat kein Objekt eine festgelegte Position, es sei denn, es stößt auf etwas anderes. Um es auf halbem Weg zwischen zwei Interaktionen zu beschreiben, verwendet man eine mathematische Funktion, die nicht im wirklichen Raum, sondern nur in abstrakten mathematischen Räumen existiert.

Aber es kommt noch schlimmer: Diese Sprünge, mit denen jedes Objekt von einer Wechselwirkung zur nächsten übergeht, ereignen sich nicht auf vorhersehbare Weise, sondern weitgehend zufällig. Es ist nicht vorzusehen, wo ein Elektron erneut auftauchen wird, berechnen lässt sich nur die *Wahrscheinlichkeit*, dass dies hier oder dort geschieht. Aus dem Innern der Physik, wo alles von präzisen, eindeutigen und unumstößlichen Gesetzen geregelt zu sein schien, lugt die Wahrscheinlichkeit hervor.

Erscheint Ihnen das absurd? Auch Einstein erschien das absurd. Einerseits schlug er Heisenberg für den Nobelpreis vor, weil er anerkannte, dass dieser etwas Wesentliches über die Welt entdeckt hatte, andererseits versäumte er keine Gelegenheit, um zu schimpfen, auf diese Weise verstehe man rein gar nichts.

Die jungen Wissenschaftler aus der Gruppe in Kopenhagen sind konsterniert: Wie denn, ausgerechnet Einstein? Ihr geistiger Vater, der Mann, der den Mut gehabt hat, das Udenkbare zu denken, macht jetzt einen Rückzieher und scheut diesen neuen Sprung ins Unbekannte, zu dem er doch selbst den Anstoß gegeben hat? Ausgerechnet Einstein, der uns gelehrt hat, dass die Zeit nicht überall gleich schnell vergeht und dass der Raum sich krümmt, ausgerechnet er sagt jetzt, so seltsam kann die Welt nicht sein?

Geduldig erklärt Niels Bohr Einstein die neuen Ideen. Einstein widerspricht. Er erfindet Gedankenexperimente, um die Widersprüchlichkeit der neuen Ideen nachzuweisen: «Stellen wir uns einen geschlossenen Kasten voller Licht vor, aus dem wir ein Photon entweichen lassen ...», beginnt eines seiner berühmten Beispiele, das Gedankenexperiment mit der «Photonenwaage». Bohr gelingt es letztlich immer, die Antwort zu finden und die Einwände zu entkräften. Die Diskussion wird jahrelang fortgeführt, in Vorträgen, Briefen, Artikeln ...

Im Lauf der Auseinandersetzung mussten beide großen Männer Zugeständnisse machen, ihre Vorstellungen ändern. Einstein musste einräumen, dass die neuen Ideen tatsächlich keinen Widerspruch enthielten. Bohr musste zugeben, dass die Dinge nicht so klar und einfach lagen, wie er anfangs gedacht hatte. Einstein wollte nicht nachgeben in dem, was für ihn der Schlüsselpunkt war: dass es eine objektive Realität gebe, unabhängig davon, wer mit wem in Wechselwirkung tritt. Bohr wollte

keine Abstriche hinnehmen an der Gültigkeit der grundlegend neuen Art und Weise, die Realität zu konzeptualisieren. Schließlich akzeptiert Einstein, dass die Theorie einen Riesenschritt vorwärts zum Verständnis der Welt darstellt, aber er ist weiterhin überzeugt, dass die Dinge so seltsam nicht sein können und dass «dahinter» eine vernünftiger Erklärung stecken muss.

Seitdem ist ein Jahrhundert vergangen, und wir stehen noch immer an demselben Punkt. Die Gleichungen der Quantenmechanik und ihre Ergebnisse werden täglich von Physikern, Ingenieuren, Chemikern und Biologen in den verschiedensten Bereichen angewandt. Für die gesamte heutige Technik sind sie in hohem Maße nützlich. Ohne die Quantenmechanik gäbe es zum Beispiel keine Transistoren. Und doch bleiben sie rätselhaft. Sie beschreiben nicht, was mit einem physischen System passiert, sondern nur, wie ein physisches System von einem anderen physischen System wahrgenommen wird. Was heißt das? Lässt sich die wesentliche Realität eines Systems nicht beschreiben? Heißt es nur, dass noch etwas an der Sache fehlt? Oder müssen wir, wie es mir scheint, die Vorstellung akzeptieren, dass die Realität einzig und allein aus Wechselwirkungen besteht?

Unser Wissen wächst, es erweitert sich zusehends. Es ermöglicht uns, Dinge zu tun, die wir uns vorher nicht einmal haben vorstellen können. Aber im Wachsen stellt es uns vor neue Fragen, neue Rätsel. Wer die Gleichungen der Theorie im Labor anwendet, kümmert sich oft nicht darum, aber in Artikeln und auf Kongressen fragen sich Physiker und Philosophen weiterhin, ja in den letzten Jahren sogar immer mehr: Wie sehen wir die Quantentheorie ein Jahrhundert nach ihrer Entstehung? Als ein außergewöhnlich tiefgründiges Verständnis der Wirklichkeit? Als einen Irrtum, der nur zufällig funktioniert? Als ein unvollständiges Puzzlespiel? Oder als ein

Indiz für etwas Grundsätzliches, das die Struktur der Welt betrifft, das wir aber noch nicht richtig verstanden haben?

Als Einstein stirbt, findet Bohr, sein großer Rivale, ergreifende Worte der Bewunderung. Als wenige Jahre später auch Bohr stirbt, macht jemand ein Foto von der Wandtafel in seinem Arbeitszimmer: Man sieht eine Zeichnung, sie stellt den Photonenkasten aus Einsteins Gedankenexperiment dar. Bis zum letzten Moment die Lust an der Konfrontation und der Wunsch, besser zu verstehen. Bis zum letzten Moment der Zweifel.

[...]